

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный
институт

Инженерные системы зданий и сооружений
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А.И. Матюшенко
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2019 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

08.03.01 «Строительство»

Анализ и управление гидравлическими режимами водяной тепловой сети
тема

Руководитель	_____	<u>профессор, д.т.н</u>	<u>Ю.Л. Липовка</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>А.С. Венин</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Нормоконтролер		_____	<u>Ю.Л. Липовка</u>
		подпись, дата	инициалы, фамилия

Красноярск 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Современное состояние вопроса по теме ВКР «Анализ и управление гидравлическими режимами водяной тепловой сети».....	6
1.1 Теоретические основы гидравлического расчета.....	6
1.2 Гидравлические режимы открытых систем теплоснабжения	10
1.2.1 Принцип работы открытой системы.....	10
1.2.2 Гидравлические режимы открытых систем	13
1.3 Гидравлические режимы закрытых систем теплоснабжения.....	19
1.3.1 Принцип работы закрытой системы	19
1.3.2 Гидравлические режимы закрытых систем.....	20
1.4 Цель и задачи исследования	21
2 Анализ гидравлических режимов открытой системы теплоснабжения.....	22
2.1 Теоретические основы расчета гидравлических режимов водяных тепловых сетей	22
2.2 Влияния непосредственного водоразбора на режим работы сезонной нагрузки.....	23
2.3 Компьютерная визуализация результатов расчета влияния непосредственного водоразбора на режим работы сезонной нагрузки	28
3 Анализ гидравлических режимов закрытой системы теплоснабжения	31
3.1 Влияния горячего водоснабжения на режим работы сезонной нагрузки	31
3.2 Компьютерная визуализация результатов расчета влияния горячего водоснабжения на режим работы сезонной нагрузки	32
Заключение	35
Список использованных источников	36
Приложение А	40
Приложение Б	41
Приложение В.....	42

Приложение Г	43
Приложение Д.....	44

ВВЕДЕНИЕ

Сложности эксплуатации открытых систем теплоснабжения связаны с необходимостью их обеспечения огромными расходами подпиточной воды, нестабильностью гидравлического режима, вызванного разностью расходов воды в подающем и обратном трубопроводах, и, – главным недостатком является низкое качество воды, поступающей к местам водоразбора. Перечисленные минусы делают открытые системы теплоснабжения технически неоправданными и экономически нецелесообразными. По этим причинам правительством РФ принят федеральный закон №190 «О теплоснабжении», в котором говорится, что с 1 января 2022 года использование централизованных систем теплоснабжения с непосредственным водоразбором из тепловой сети запрещается. Следовательно, необходим перевод всех потребителей на закрытую систему путем установки в местных тепловых пунктах поверхностных теплообменников. В связи с этим стоит задача провести анализ, изменения гидравлического режима при переходе от открытой системы к закрытой системе.

Открытая система теплоснабжения широко распространена во всех населенных пунктах нашей страны. И поэтому вопрос перехода является столь актуальным. Особенно остро данная проблема стоит для больших городов, так как задача поставлена, а четкой стратегии реализации столь масштабных изменений в системе теплоснабжения нет. Существуют лишь различные оценки целесообразности проекта, в которых авторы обсуждают его необходимость, приводя в доводы положительные и отрицательные моменты.

Переход на закрытую систему теплоснабжения обеспечит повышение уровня качества горячей воды до необходимых гигиенических требований. Это объясняется тем, что при отборе воды из обратного трубопровода к потребителю поступает вода, прошедшая через нагревательные приборы

системы отопления, где скорости теплоносителя незначительны, что способствует отложению загрязнений. При условиях высокого внутреннего износа трубопроводов и отопительных приборов на стенках появляются существенные коррозионные отложения, которые в значительной мере снижают физико-химические показатели качества воды [25].

Ко второй причине перехода можно отнести стабильность гидравлического режима закрытых систем благодаря постоянству расхода в подающей и обратной магистрали. Эта положительная особенность приводит к необходимости учета ещё одного критерия – обнаружения аварий на тепловых сетях. Хорошо известно, что внутренняя коррозия труб образует небольшие отверстия, через которое происходят утечки теплоносителя. Обнаружить такие повреждения в открытой системе весьма трудно, так как гидравлический режим неустойчив и зависит от водопотребления и, напротив, в закрытых системах выявления такого рода неполадок удастся благодаря устойчивому давлению на входе в тепловой пункт, и в случае его падения, возможно, сразу определить приблизительное место аварии [5].

В работе [9] акцентировано внимание на рассмотрении комплексного подхода, включающего одновременный переход на закрытую систему и независимую схему подключения системы отопления.

1 Современное состояние вопроса по теме ВКР «Анализ и управление гидравлическими режимами водяной тепловой сети»

1.1 Теоретические основы гидравлического расчета

Гидравлический расчет – является неотъемлемой частью расчетов при проектировании новых, а также наладки действующих систем теплоснабжения.

При проектировании системы теплоснабжения решается прямая задача гидравлического расчета, которая заключается в определении диаметров труб и потерь давления на участках сети. Кроме этого производится гидравлическая увязка всей системы.

Перед началом выполнения гидравлического расчета необходимо сделать схему и профиль тепловой сети, определиться с источником тепла и рассчитать нагрузки тепловой энергии для всех потребителей.

В случае необходимости проведения наладочных работ для уже существующей системы теплоснабжения решается обратная задача гидравлического расчета, при которой определяется пропускная способность трубопроводов при заданном значении потерь давления.

На основании полученных результатов гидравлического расчета:

- определяют требуемые капиталовложения, по материальным ресурсам и объему необходимых работ;
- выполняют построения пьезометрических графиков;
- подбирают сетевые и подпиточные насосы;
- определяют схемы подключения потребителей к тепловой сети.

При расчете простых схем теплоснабжения, таких как тупиковые распределительные сети, применяются следующие методы гидравлического расчета: метод удельных потерь давления, метод приведенных длин и метод характеристик сопротивления.

Метод удельных потерь давления, заключается в подсчете общих потерь давления на участке сети путем сложения отдельно рассчитанных потерь давления на трение и в местных сопротивлениях.

Потери давления на трение:

$$\Delta P_{\text{л}} = R \cdot l, \quad (1)$$

где R – удельные линейные потери давления, Па/м;

l – длина участка, м.

Потери давления в местных сопротивлениях:

$$\Delta P_{\text{м}} = \sum \xi \cdot P_{\text{д}}, \quad (2)$$

где $\sum \xi$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений на участке;

$P_{\text{д}}$ – динамическое давление на участке, Па.

Метод приведенных длин отличается от метода удельных потерь давления тем, что потери давления в местных сопротивлениях заменяются эквивалентной длиной.

При расчете по методу характеристик сопротивления потери давления определяются по формуле:

$$\Delta P = S \cdot G^2, \quad (3)$$

где S – характеристика гидравлического сопротивления участка, Па/(кг/ч)²;

G – расход воды на участке, кг/ч.

Для расчета потокораспределения в кольцевых городских сетях можно использовать довольно несложные методы последовательных приближений основоположниками, которых были В. Г. Лобачев, Х. Кросс и М. М. Андрияшев. К данным методам относятся: метод поконтурной увязки перепадов давлений и метод поузловой увязки расходов. Методы основаны на увязке системы путем перераспределения расхода по участкам сети таким

образом, чтобы в конечном итоге расходы на всех участках и давления в узлах с заданной точностью удовлетворяли законам Кирхгофа.

При расчете сложных схем, в которых заданы значения напора на источнике и сопротивления на соседних участках различаются на несколько порядков, сказанные выше методы последовательных приближений не обеспечивают численной сходимости. Для расчета таких схем коллективом советских ученых под руководством академиков В. Я. Хасилева и А. П. Меренкова разработаны обобщенные методы контурных расходов и узловых давлений.

В 1987 году Э. Тодини опубликованы работы с новым методом глобального градиентного алгоритма. Данный метод является гибридным контурно-узловым методом обеспечивающий быструю сходимость с достаточно высокой точностью и позволяет моделировать сети на участках, которых установлены различные виды автоматических регуляторов, поддерживающие заданные параметры расхода или перепада давления.

За последние годы в области математического моделирования гидравлических цепей авторами предложены различные модификации существующих методов расчета, уменьшающие количество итерационных процессов и позволяющие рассчитывать схемы с более сложной топологией.

В статье [15] рассмотрено использования принципа линеаризации в узловых моделях. И описаны новые методы хорд и секущих с демонстрацией их эффективности на численном примере.

Авторами [8] показано решения задачи потокораспределения для случайной гидравлической цепи способом нахождения максимумов и минимумов функции Релея для нескольких переменных. Данная функция выражается через гидравлические характеристики участков системы.

В статье [14] предложен вариант улучшенного метода узловых давлений, который обладает многофункциональностью по видам замыкающих соотношений, по сравнению с классическим методом, а также обладает меньшим количеством вычислений.

В работах [16, 18] говорится о необходимости оптимизации и надежности функционирования гидравлических систем, путем использования математического моделирования построенного на аналитических вероятностных моделях потокораспределения. Приводятся модели регулируемого потокораспределения в тепловых сетях с математическими выкладками задач повышения эффективности, построенных на применение возможных вариантов минимизации управляющих воздействии, снижения уровня давления в тепловой сети для сокращения аварийности системы, а также постановки многокритериальных задач с постоянным и переменным основным критерием. Для решения таких задач при условии постоянства главного критерия используется метод бисекции, на каждом этапе которого применяется метод внутренних точек, а при дискретном критерии проверялись три метода: полного перебора, ветвлений и отсечений, ветвей и границ, на каждом этапе всех трех методов также применялся метод внутренних точек.

В публикации [17] акцентируется внимание на значимости построения многоуровневых компьютерных моделей систем теплоснабжения. Для этого авторы предлагают созданный ими программный комплекс, который позволяет анализировать гидравлические режимы достаточно крупных систем централизованного теплоснабжения. Программа построена на использование: теории графов, теории гидравлических цепей, методов нелинейного программирования и иерархического моделирования.

В работе [29] автором предложена методика аналитического решения задач потокораспределения для ускоренного проектирования многоконтурных тепловых сетей. Представленный метод расщепления графа дает возможность сократить количество расчетных операции при численном моделировании гидравлических цепей. Задача сводится к решению алгебраического уравнения четвертой степени по методу Феррари.

Авторами [24] предложен метод выявления оптимальных параметров системы теплоснабжения, основанный на последовательной и

многоконтурной компьютерной оптимизации. Многоуровневое расщепление модели тепловой сети позволяет плавно перейти от исходных данных к комплексному набору небольших и весьма несложных подзадач.

В статьях [3, 4] для описания гидравлической сети произведен переход от методик, основанных на совместном решении уравнения массового баланса, которые базируются на законах Кирхгофа, к моделированию с помощью дискретизации уравнения неразрывности потока. Новый метод расчета тепловых сетей строится на численном конечно-разностном методе контрольного объема. При моделировании потоков решение задачи сводится к преобразованию расчетной схемы в вид единой области давления. Скорость сходимости метода близка к сходимости градиентного алгоритма Тодина и не имеет ограничений в размерности задачи.

В работе [31] представлен сравнительный анализ большого количества существующих на сегодняшний день формул определения коэффициента гидравлического трения в трубопроводах по уровню точности полученных значений и времени расчета. Для плавного перехода от ламинарного режима течения жидкости к турбулентному режиму в критической зоне предложено использовать кубическую интерполяцию.

В статье [30] поднят вопрос анализа потокораспределения в регулируемых системах теплоснабжения. Предлагается способ усовершенствования метода глобального градиента учетом отметок рельефа местности и пьезометрических напоров, что обеспечивает возможность оценки режимов работы гидравлических систем с высоким уровнем автоматизации и наличием насосных подстанций.

1.2 Гидравлические режимы открытых систем теплоснабжения

1.2.1 Принцип работы открытой системы

Высокая неустойчивость гидравлических режимов является особенностью работы открытых систем теплоснабжения. При появлении у

потребителя нагрузки на горячее водоснабжения соотношение расходов воды в подающем и обратном трубопроводе различаются на величину водоразбора плюс утечка из системы.

Рассмотрим принцип работы открытой системы теплоснабжения, схема которой изображена на рисунке 1.

За поддержание гидродинамического режима работы системы отвечает сетевой насос СН, который повышает напор воды, поступившей из обратного трубопровода с температурой t_2 , и направляет её в теплоподготовительную установку ТУ. В теплоподготовительной установке вода нагревается до температуры t_1 после чего высокотемпературный теплоноситель поступает в подающей трубопровод.

Напор в обратном трубопроводе на линии всасывания сетевого насоса поддерживается на постоянном уровне в результате работы подпиточного насоса ПН и регулятора давления РД. Регулятор давления дросселирует напор, развиваемый подпиточным насосом, обеспечивая неизменный напор в месте отбора импульса на байпасной линии сетевого насоса. При значительном сокращении теплоносителя в системе, давление в точке отбора импульса начинает снижаться, из-за чего регулятор давления приоткрывается и увеличивается подпитка. После восстановления давления клапан закрывается.

В случае прироста объема воды в системе за счет повышения температуры, давления в точке отбора импульса возрастет и срабатывает дренажный клапан ДК, который сбрасывает часть лишней воды.

При остановке сетевого насоса циркуляция теплоносителя в системе отсутствует и наступает статически режим работы системы теплоснабжения. Подпиточный насос поддерживает постоянный напор во всей системе, а регулятор давления при этом открыт на максимум.

Обеспечение системы подпиточной водой осуществляется комплексом оборудования химводоочистки ХВО.

Из основного оборудования, установленного в тепловом пункте потребителя тепла это:

- регулятор температуры РТ, который поддерживает постоянное значение температуры воды t_h , поступающей в систему горячего водоснабжения;
- смесительный насос СМ.Н снижает температуру воды поступающую в систему отопления путем смешения высокотемпературной воды из подающего трубопровода с охлажденной водой после системы отопления.

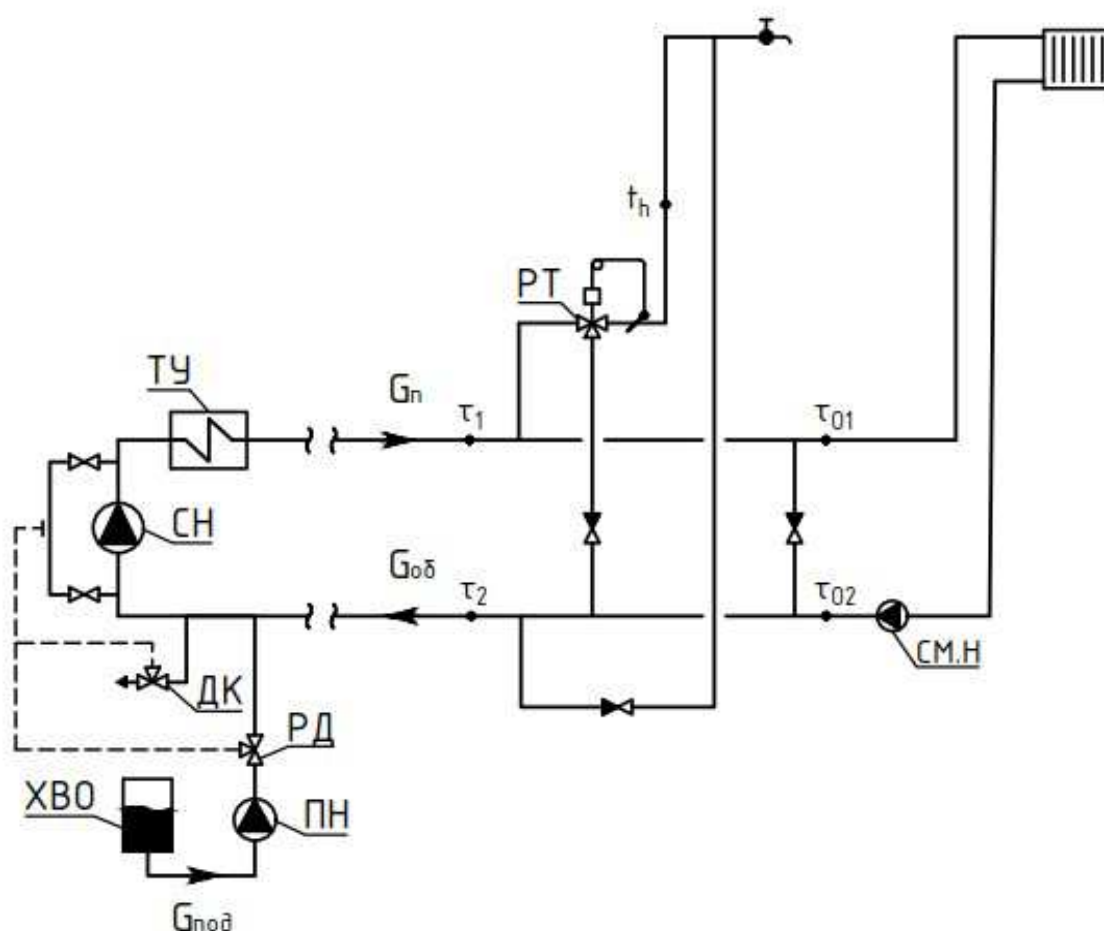


Рисунок 1 – Принципиальная схема открытой системы теплоснабжения:
ТУ – теплоподготовительная установка; СН – сетевой насос; ПН – подпиточный насос; РД – регулятор давления; ДК – дренажный клапан; ХВО – химводоочистка; РТ – регулятор температуры; СМ.Н – смесительный насос; τ_1, τ_2 – температура воды в подающем и обратном трубопроводе тепловой сети; τ_{01}, τ_{02} – температура воды в подающем и обратном трубопроводе системы отопления; t_h – температура в системе горячего водоснабжения.

1.2.2 Гидравлические режимы открытых систем

Задачей расчета переменных гидравлических режимов является обеспечение требуемых располагаемых напоров на абонентских вводах потребителей для подачи расхода воды в соответствии с их тепловой нагрузкой.

При разработке гидравлических режимов автоматизированной системы теплоснабжения необходимо перед тепловым пунктом абонента лишь обеспечить располагаемый напор, который будет больше минимально допустимого для нормальной работы систем теплопотребления. Избыточный располагаемый напор дросселироваться на регулирующих клапанах вследствие чего потребитель всегда получит требуемый ему расход.

В случае не автоматизированной системы теплоснабжения расходы воды распределяются в зависимости от конфигурации и гидравлических сопротивлений всех составляющих элементов сети. Поэтому единственным средством обеспечения потребителей необходимыми расходами воды при переменных гидравлических режимах является повышение гидравлической устойчивости системы.

Рассмотрим гидравлические режимы абонентов при различных вариантах устройства тепловых пунктов:

1) Гидравлические режимы открытой системы теплоснабжения без установки регуляторов расхода.

Для осуществления центрального регулирования потребителей неоснащенных регуляторами расхода необходимо, чтобы располагаемые напоры перед тепловыми пунктами все абонентов были равны. Этого возможно добиться, установкой на подающем и обратном трубопроводе, индивидуально рассчитанных диафрагм. После чего располагаемые напоры всех потребителей при отсутствии водоразбора станут равны, а при его появлении степень изменения расходов воды в системах отопления будет примерно сопоставима.

На рисунке 2 показан пьезометрический график открытой системы теплоснабжения без установки регуляторов расхода.

Гидравлическому режиму при отсутствии водоразбора соответствуют пьезометрические линии 1. Расходы в подающем и обратном трубопроводе равны, поэтому линии симметричны.

Гидравлическому режиму при наличии водоразбора только из подающего трубопровода соответствуют пьезометрические линии 2. При данном режиме параллельно системе отопления начинает работать циркуляционный контур, проходящий через клапан смешения. Вследствие чего суммарное сопротивление системы снижается и по подающему трубопроводу поступает повышенный расход воды. Увеличение потерь в подающем трубопроводе приводит к снижению располагаемого напора, что в свою очередь влечет к сокращению расхода воды через систему отопления.

При максимальном водоразборе из подающего трубопровода, когда расход на горячее водоснабжения равен расходу на отопление наступает предельный режим, которому соответствуют пьезометрические линии 3. Напор в подающем и обратном трубопроводе установится на минимальном уровне равном высоте здания. Регулятор давления полностью закроется и движение воды после абонентской установки прекратится.

При наличии водоразбора только из обратной линии начинает работать параллельный обратному трубопроводу циркуляционный контур, проходящий через клапан смешения. Суммарное сопротивление системы снижается из-за чего через контур отопления проходит повышенный расход воды.

При максимальном водоразборе из обратного трубопровода, когда расход на горячее водоснабжения равен расходу, проходящему через систему отопления наступает предельный режим, которому соответствуют пьезометрические линии 4. При этом расход через систему отопления будет максимальный. Регулятор давления, как и в предыдущем предельном

режиме, закроется, а движение воды после абонентской установки прекратится.

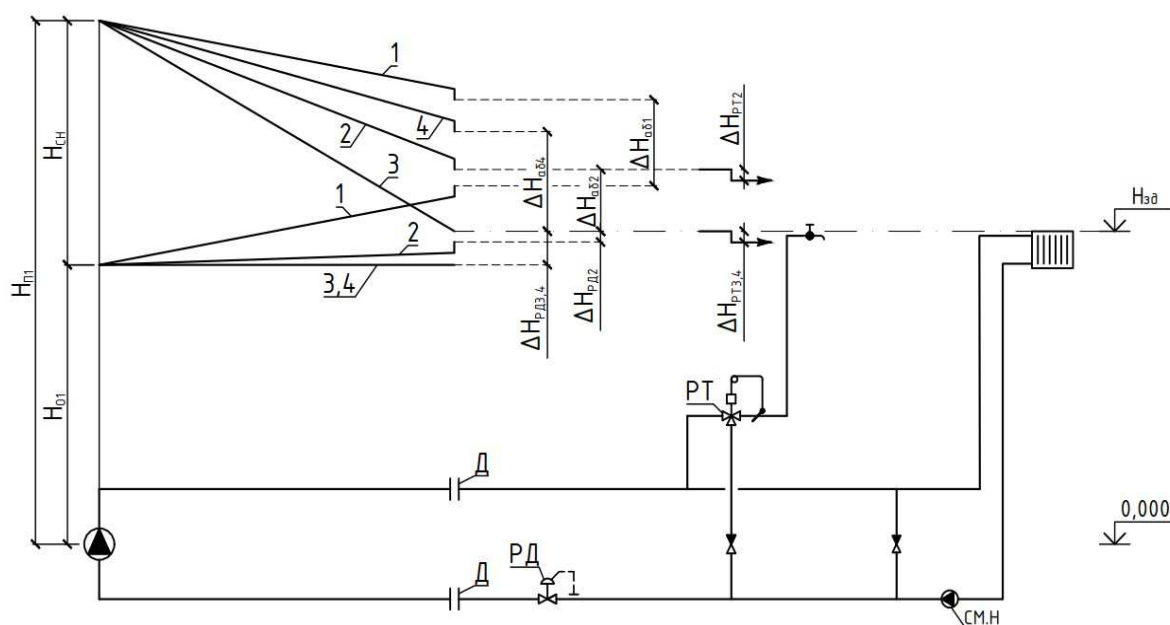


Рисунок 2 – Пьезометрический график открытой системы теплоснабжения без установки регуляторов расхода:

1 – пьезометрические линии при отсутствии водоразбора; 2 – при наличии водоразбора только из подающего трубопровода; 3 – при максимальном водоразборе из подающего трубопровода равному расходу воды на отопление; 4 – при максимальном водоразборе из обратного трубопровода.

2) Гидравлические режимы открытой системы теплоснабжения при установке регуляторов расхода перед системой отопления.

Работа системы отопления и горячего водоснабжения устроена по принципу несвязанного регулирования. Регулятор расхода при всех режимах работы абонентской установке обеспечивает расчетный расход воды в системе отопления.

На рисунке 3 показан пьезометрический график открытой системы теплоснабжения при установке регуляторов расхода перед системой отопления.

Гидравлическому режиму при отсутствии водоразбора соответствуют пьезометрические линии 1. Избыточный располагаемый напор перед системой отопления дросселируется регулятором расхода, поэтому по подающему и обратному трубопроводу протекает только отопительный расход.

Гидравлическому режиму при максимальном водоразборе из подающего трубопровода соответствуют пьезометрические линии 2. По подающему трубопроводу протекает наибольший расход воды равный расходу на отопление и максимальному на горячее водоснабжение. По обратному трубопроводу также идет наибольший расход равный расходу на отопление. Поэтому пьезометрические линии как подающего, так и обратного трубопровода принимают наибольший уклон.

Гидравлическому режиму при максимальном водоразборе из обратного трубопровода соответствуют пьезометрические линии 3. По подающему трубопроводу протекает только отопительный расход, а в обратном трубопроводе циркуляция воды прекратиться. Поэтому пьезометрические линии как подающего, так и обратного трубопровода, имеют минимальный уклон.

Гидравлическому режиму при одновременном отборе воды из подающего и обратного трубопровода соответствуют пьезометрические линии 4, которые занимают промежуточное место между предельными положениями.

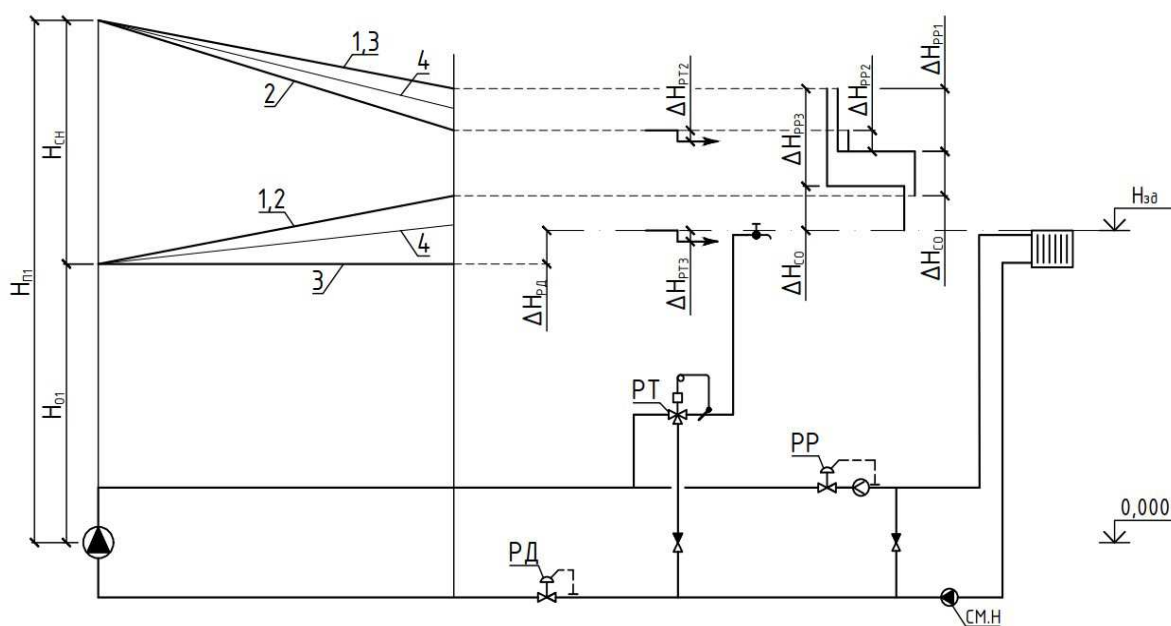


Рисунок 3 – Пьезометрический график открытой системы теплоснабжения при установке регуляторов расхода РР перед системой отопления:

1 – пьезометрические линии при отсутствии водоразбора; 2 – при максимальном водоразборе из подающего трубопровода; 3 – при максимальном водоразборе из обратного трубопровода; 4 – при промежуточных режимах.

3) Гидравлические режимы открытой системы теплоснабжения при установке регуляторов расхода перед абонентским вводом.

Работа системы отопления и горячего водоснабжения устроена по принципу связанного регулирования. Регулятор расхода обеспечивает постоянный расход воды в подающем трубопроводе при любом режиме работы абонентской установки.

На рисунке 4 показан пьезометрический график открытой системы теплоснабжения при установке регуляторов расхода перед абонентским вводом.

Рассмотрим случай, когда регулятор расхода настроен на пропуск расчетного расхода воды на отопление.

Гидравлическому режиму при отсутствии водоразбора соответствуют пьезометрические линии 1.

При водоразборе только из подающей линии система отопления недополучает количества тепла, а расход в обратном трубопроводе сокращается. Гидравлическому режиму при максимальном водоразборе из подающего трубопровода соответствуют пьезометрические линии 2.

Гидравлическому режиму при максимальном водоразборе из обратного трубопровода соответствуют пьезометрические линии 3.

Гидравлическому режиму при одновременном отборе воды из подающего и обратного трубопровода соответствуют пьезометрические линии 4.

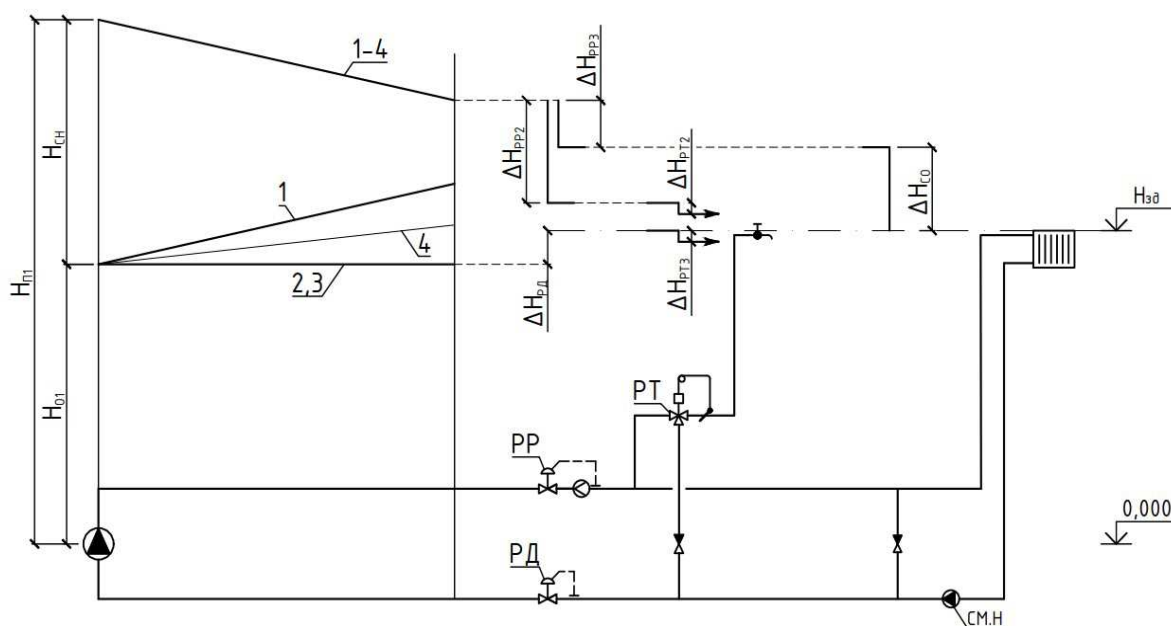


Рисунок 4 – Пьезометрический график открытой системы теплоснабжения

при установке регуляторов расхода РР перед абонентским вводом:

1 – пьезометрические линии при отсутствии водоразбора; 2 – при максимальном водоразборе из подающего трубопровода; 3 – при максимальном водоразборе из обратного трубопровода; 4 – при промежуточных режимах.

1.3 Гидравлические режимы закрытых систем теплоснабжения

1.3.1 Принцип работы закрытой системы

В отличие от сложных гидравлических режимов открытых систем теплоснабжения пьезометрические линии закрытых систем обладают ярко выраженным симметричным характером, из-за практически равных расходов в подающем и обратном трубопроводе. Различие расходов приходится на величину утечки теплоносителя, которая составляет не более 0,5 % от общего объема сетевой воды.

Принципиальная схема закрытой системы теплоснабжения представлена на рисунке 5.

Различие в оборудовании закрытой и открытой системы теплоснабжения состоит в установке у потребителей поверхностных подогревателей горячего водоснабжения П.ГВС, в которых за счет теплопередачи сетевая вода нагревает водопроводную воду до требуемой температуры для подачи в систему горячего водоснабжения.

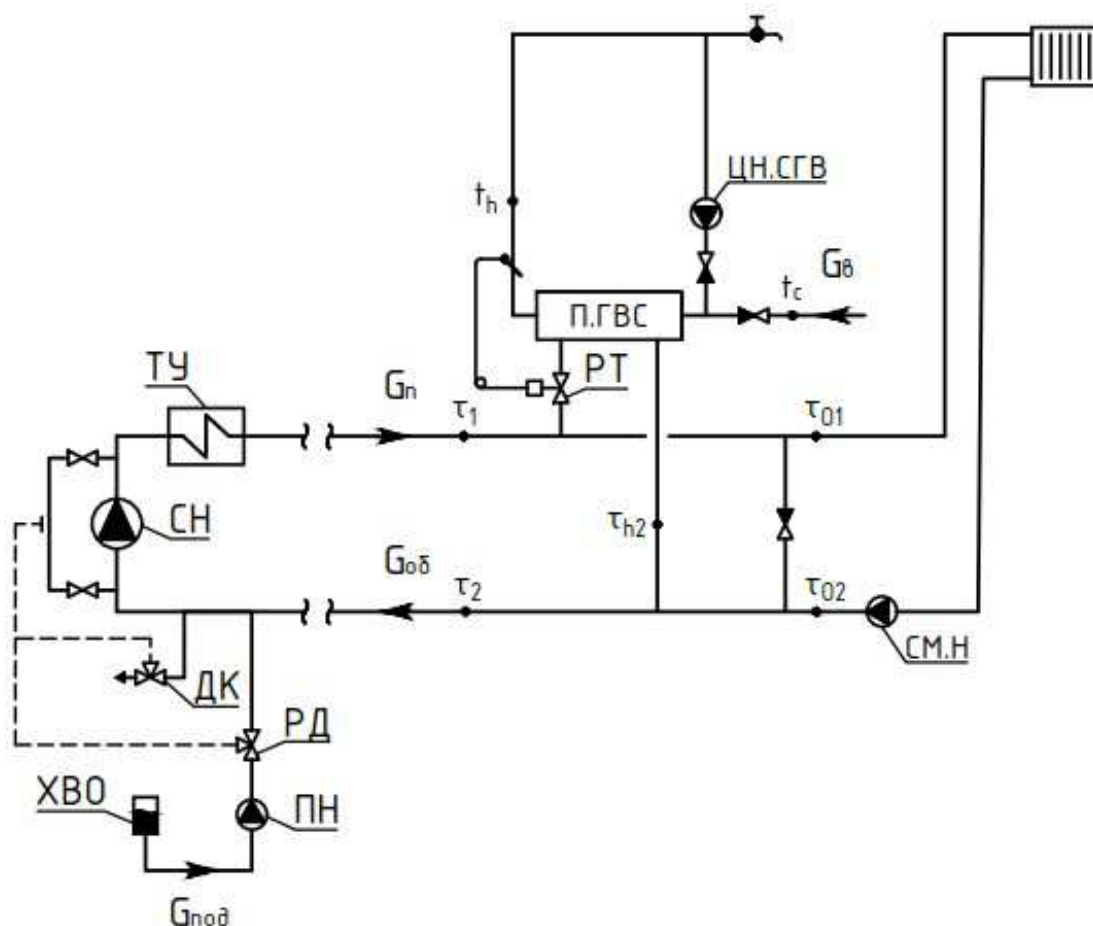


Рисунок 5 – Принципиальная схема закрытой системы теплоснабжения:

П.ГВС – подогреватель горячего водоснабжения; ЦН.СГВ – циркуляционный насос системы горячего водоснабжения; t_{h2} – температура воды на выходе из подогревателя; t_c – температура водопроводной воды; остальные обозначения те же, что и на рисунке 1.

1.3.2 Гидравлические режимы закрытых систем

На рисунке 6 показан пьезометрический график закрытой системы теплоснабжения при параллельном присоединении подогревателя горячего водоснабжения.

Гидравлическому режиму при отсутствии нагрузки на горячее водоснабжения соответствуют пьезометрические линии 1.

При появлении нагрузки на горячее водоснабжения регулятор температуры приоткрывается, и часть сетевой воды поступает в

подогреватель горячего водоснабжения. Располагаемый напор перед системой отопления снижается.

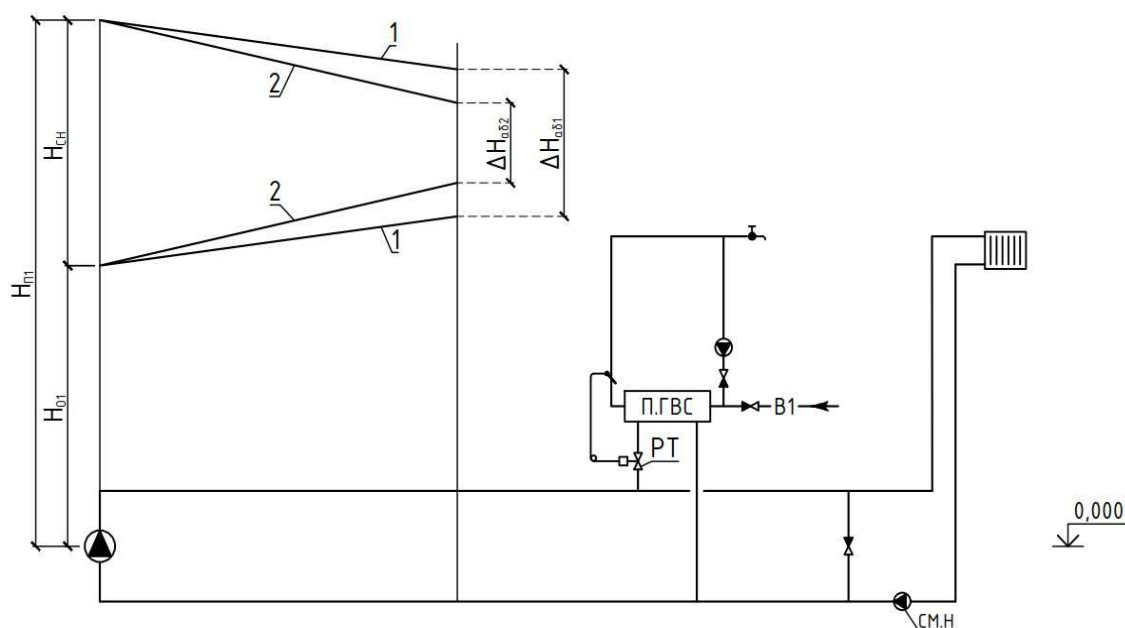


Рисунок 6 – Пьезометрический график закрытой системы теплоснабжения при параллельном присоединении подогревателя горячего водоснабжения:
1 – пьезометрические линии при отсутствии нагрузки на горячее водоснабжение; 2 – при наличии нагрузки на горячее водоснабжение.

1.4 Цель и задачи исследования

Целью работы является выявление первичных независимых параметров, влияющих на гидравлические режимы тепловой сети, их анализ и разработка методики управления.

Для осуществления поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Анализ влияния переменных гидравлических режимов работы тепловой сети на сезонную нагрузку.
2. Разработка методики плавного перевода существующих открытых систем теплоснабжения на закрытые системы.

2 Анализ гидравлических режимов открытой системы теплоснабжения

2.1 Теоретические основы расчета гидравлических режимов водяных тепловых сетей

Потери напора:

$$\Delta H = S \cdot G^2, \quad (4)$$

где S – характеристика гидравлического сопротивления участка, $\text{м} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^6$;

G – расход воды, $\text{м}^3 / \text{с}$.

Характеристика гидравлического сопротивления участка сети:

$$S = \frac{A_R \cdot (l + l_{\text{э}})}{d^{5,25}}, \quad (5)$$

где l , $l_{\text{э}}$ – длина участка и эквивалентная длина местных сопротивлений, м;

d – диаметр трубопровода, м;

A_R – коэффициент, принимается в зависимости от абсолютной эквивалентной шероховатости внутренней поверхности трубопровода.

Проводимость участка сети:

$$a = \frac{1}{\sqrt{S}}, \quad (6)$$

Общее сопротивление последовательно соединенных участков сети:

$$S = S_1 + S_2, \quad (7)$$

Общая проводимость параллельно соединенных участков сети:

$$a = a_1 + a_2, \quad (8)$$

Уравнение, описывающее характеристику центробежного насоса для рабочего участка:

$$H = H_0 - S_0 \cdot G^2, \quad (9)$$

где H_0 – условный напор насоса при отсутствии расхода, м;

S_0 – условное сопротивление насоса, $\text{м} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^6$;

G – то же, что и в формуле (4).

Развиваемая мощность насоса при номинальном режиме работы, кВт:

$$N_H = \frac{g G_H H_H}{\eta_H}, \quad (10)$$

где g – ускорение свободного падения, $\text{м} / \text{с}^2$;

G_H – расход воды, прокачиваемый насосом при номинальном режиме работы, $\text{м}^3 / \text{с}$;

H_H – напор насоса при номинальном режиме работы, м;

η_H – КПД насоса при номинальном режиме работы.

Развиваемая мощность насоса при расходе отличном от номинального, кВт:

$$N = N_H \left[x + \frac{G}{G_H} (1 - x) \right], \quad (11)$$

где N_H – мощность насоса при номинальном режиме работы, кВт:

x – коэффициент холостого хода;

G – то же, что и в формуле (4);

G_H – то же, что и в формуле (10).

2.2 Влияния непосредственного водоразбора на режим работы сезонной нагрузки

В абонентских установках открытой системы теплоснабжения отбор воды для нужд горячего водоснабжения происходит непосредственно из тепловой сети. В период низких наружных температур воздуха водоразбор осуществляется из обратного трубопровода после системы отопления, а при

положительных температурах из подающего трубопровода перед системой отопления. В остальное время отопительного периода вода на горячее водоснабжение поступает частично как из подающего, так и обратного трубопровода в зависимости от сезонного повышения температуры сетевой воды. Смешение воды в необходимой пропорции осуществляется регулятором температуры.

Доля отбора воды на горячее водоснабжения из подающего трубопровода:

$$\beta = \frac{t_h - \tau_2}{\tau_1 - \tau_2}, \quad (12)$$

где t_h – температура горячей воды, °С;

τ_1, τ_2 – температура сетевой воды в подающем и обратном трубопроводе, °С.

Для исследования режимов работы абонентских установок без регуляторов расхода будет использоваться уравнение гидравлике, связывающее характеристику сопротивления системы с располагаемым напором на абонентском вводе и величиной расхода воды (4).

Выражение для определения относительного располагаемого напора на абонентском вводе:

$$\Delta \bar{H} = \bar{S}'(\bar{G}_o + \beta \bar{G}_h)^2 + \bar{S}_o \bar{G}_o^2 + \bar{S}''[\bar{G}_o - (1 - \beta)\bar{G}_h]^2, \quad (13)$$

где \bar{G}_o, \bar{G}_h – относительный расход сетевой воды на отопление и горячее водоснабжение;

$\bar{S}', \bar{S}'', \bar{S}_o$ – относительные характеристики гидравлических сопротивлений подающего и обратного трубопровода абонентского ввода и системы отопления;

β – доля отбора воды на горячее водоснабжения из подающего трубопровода.

Поскольку при последовательном соединении участков характеристики гидравлических сопротивлений складываются, запишем: $\bar{S}' + \bar{S}_0 + \bar{S}'' = 1$ из этого следует, что $\bar{S}_0 = 1 - \bar{S}' - \bar{S}''$.

Решая уравнение (13) относительно \bar{G}_0 , получаем выражение для определения относительного расхода воды в системе отопления при наличии водоразбора:

$$\begin{aligned} \bar{G}_0 = & -\bar{G}_h [\beta \bar{S}' - (1 - \beta) \bar{S}''] + \\ & + \sqrt{\bar{G}_h^2 [\beta \bar{S}' - (1 - \beta) \bar{S}'']^2 - \bar{G}_h^2 [\beta^2 \bar{S}' + (1 - \beta)^2 \bar{S}''] + \Delta \bar{H}}, \end{aligned} \quad (14)$$

Расчет «отопительного» графика отпуска тепла.

Перепад температур воды в тепловой сети при t_0 :

$$\delta \tau' = \tau'_1 - \tau'_{02}, \quad (15)$$

где τ'_1 – расчетная температура воды в подающем трубопроводе тепловой сети, °С;

τ'_{02} – расчетная температура воды в обратном трубопроводе тепловой сети, °С.

Перепад температур воды в системе отопления при t_0 :

$$\theta' = \tau'_{01} - \tau'_{02}, \quad (16)$$

где τ'_{01} – расчетная температура воды в подающем трубопроводе системы отопления, °С;

τ'_{02} – то же, что и в формуле (15).

Температурный напор отопительных приборов при t_0 :

$$\Delta t'_0 = \frac{\tau'_{01} + \tau'_{02}}{2} - t_{int}, \quad (17)$$

где τ'_{01} – то же, что и в формуле (16);

τ'_{02} – то же, что и в формуле (15);

t_{int} – температура внутреннего воздуха, °С.

Относительная тепловая нагрузка на отопление:

$$\bar{Q}_o = \frac{t_{int} - t_n}{t_{int} - t_o}, \quad (18)$$

где t_{int} – то же, что и в формуле (17);

t_n – температура наружного воздуха, °С;

t_o – расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления, °С.

Температура воды в подающем трубопроводе тепловой сети по «отопительному графику»:

$$\tau_1^{var} = t_{int} + \Delta t_o' \cdot \bar{Q}_o^{0,8} + (\delta\tau' - 0,5 \cdot \theta') \cdot \bar{Q}_o, \quad (19)$$

где t_{int} – то же, что и в формуле (17);

$\Delta t_o'$ – температурный напор отопительных приборов при t_o , °С;

\bar{Q}_o – относительная тепловая нагрузка на отопление;

$\delta\tau'$ – перепад температур воды в тепловой сети при t_o , °С;

θ' – перепад температур воды в системе отопления при t_o , °С.

Температура воды в обратном трубопроводе тепловой сети по «отопительному графику»:

$$\tau_2^{var} = \tau_1^{var} - \delta\tau' \cdot \bar{Q}_o, \quad (20)$$

где τ_1^{var} – температура воды в обратном трубопроводе тепловой сети по «отопительному графику», °С;

\bar{Q}_o , $\delta\tau'$ – то же, что и в формуле (19).

Расчет «скорректированного» графика отпуска тепла.

Балансовая нагрузка на ГВС:

$$\alpha_h^6 = \chi_6 \cdot \frac{Q_{hm}}{Q_{omax}}, \quad (21)$$

где χ_6 – поправочный коэффициент для компенсации небаланса теплоты на отопление, вызываемого неравномерностью суточного графика ГВС;

Q_{hm} – средняя нагрузка на ГВС, Вт;

Q_{omax} – максимальный тепловой поток на отопление, Вт.

Относительный расход на отопление:

$$\bar{W}_0 = \frac{1 - 0,5 \cdot \alpha_h^6 \cdot \frac{\theta'}{t_h - t_c}}{1 + \frac{t_h - t_{int}}{t_h - t_c} \cdot \frac{\alpha_h^6}{\bar{Q}_0} - \frac{\Delta t'_0}{t_h - t_c} \cdot \frac{\alpha_h^6}{\bar{Q}_0^{0,2}}}, \quad (22)$$

где α_h^6 – балансовая нагрузка на ГВС;

t_h – то же, что и в формуле (12);

t_c – температура холодной воды, °С;

t_{int} – то же, что и в формуле (17);

θ' , \bar{Q}_0 – то же, что и в формуле (19).

Температура воды в подающем трубопроводе по «скорректированному графику»:

$$\tau_1^K = t_{int} - \frac{\bar{Q}_0}{\bar{W}_0} \cdot \left(\delta \tau' + \Delta t'_0 \cdot \frac{\bar{W}_0}{\bar{Q}_0^{0,2}} - 0,5 \cdot \theta' \right), \quad (23)$$

где t_{int} – то же, что и в формуле (17);

\bar{Q}_0 , $\delta \tau'$, θ' – то же, что и в формуле (19);

\bar{W}_0 – относительный расход на отопление.

Температура воды в обратном трубопроводе по «скорректированному графику»:

$$\tau_2^K = t_{int} - \frac{\bar{Q}_0}{\bar{W}_0} \cdot \left(\Delta t'_0 \cdot \frac{\bar{W}_0}{\bar{Q}_0^{0,2}} - 0,5 \cdot \theta' \right), \quad (24)$$

где t_{int} – то же, что и в формуле (17);

\bar{Q}_0 , θ' – то же, что и в формуле (19);

\bar{W}_0 – то же, что и в формуле (23).

2.3 Компьютерная визуализация результатов расчета влияния непосредственного водоразбора на режим работы сезонной нагрузки

На основании уравнения (14) рассмотрим влияние таких факторов, как \bar{G}_h , β , \bar{S}' , \bar{S}'' на изменение относительного расхода в системе отопления.

При дальнейших расчетах принято, что располагаемый напор в точке присоединения абонента постоянный и равен ($\Delta\bar{H} = 1$).

На рисунке 7 показана зависимость относительного расхода воды на сезонную нагрузку \bar{G}_0 , найденную по формуле (14) при изменении $\bar{G}_h = 0 \div 1$ и $\beta = 0 \div 1$. Расчеты с Excel файла представлены в приложении А.

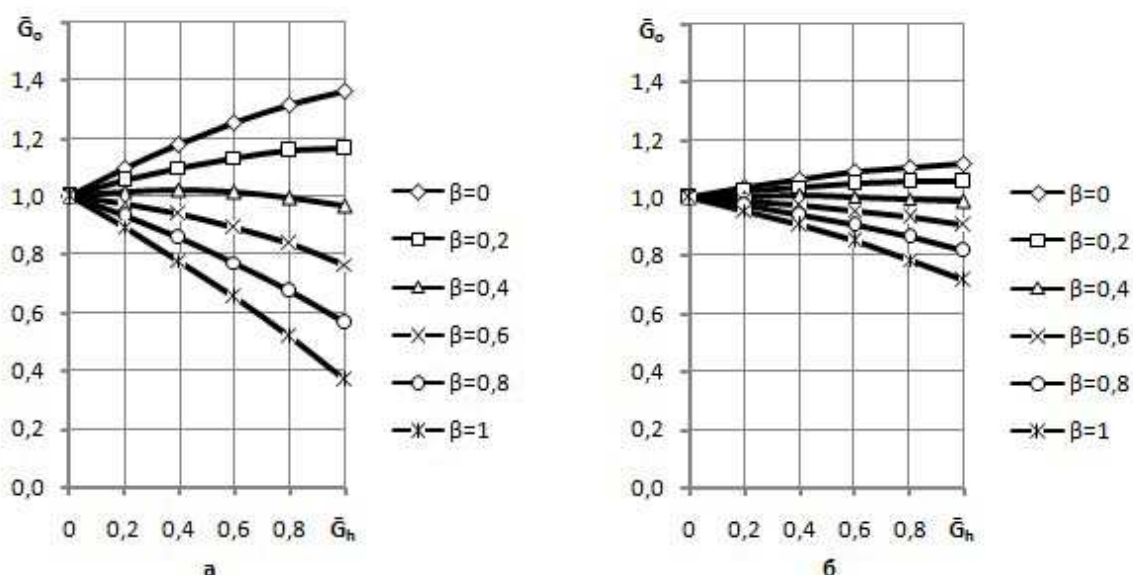


Рисунок 7 – Зависимость относительного расхода воды на сезонную нагрузку \bar{G}_0 от величины водоразбора \bar{G}_h и доли отбора из подающей линии β :

а – при $\bar{S}' = \bar{S}'' = 0,5$; б – при $\bar{S}' = \bar{S}'' = 0,2$.

Из графиков видно, что при увеличении водоразбора из подающего трубопровода расход на сезонную нагрузку уменьшается, а при увеличении из обратного трубопровода увеличивается. При повышении гидравлической

устойчивости системы теплоснабжения влияния водоразбора на сезонную нагрузку снижается, а значения величин \bar{S}' (\bar{S}'') приближаются к нулю.

На рисунке 8 показана зависимость относительного расхода воды на сезонную нагрузку \bar{G}_o от относительной тепловой нагрузки \bar{Q}_o в течение всего отопительного периода и при различных значениях относительной величины водоразбора \bar{G}_h . При расчете приняты следующие исходные данные: график отпуска тепла «отопительный» с параметрами 150 / 70; $\bar{S}' = \bar{S}'' = 0,3$; $t_o = -37$ °C; $t_{int} = 20$ °C; $\tau'_{o1} = 95$ °C; $t_h = 60$ °C. Расчеты с Excel файла представлены в приложении Б.

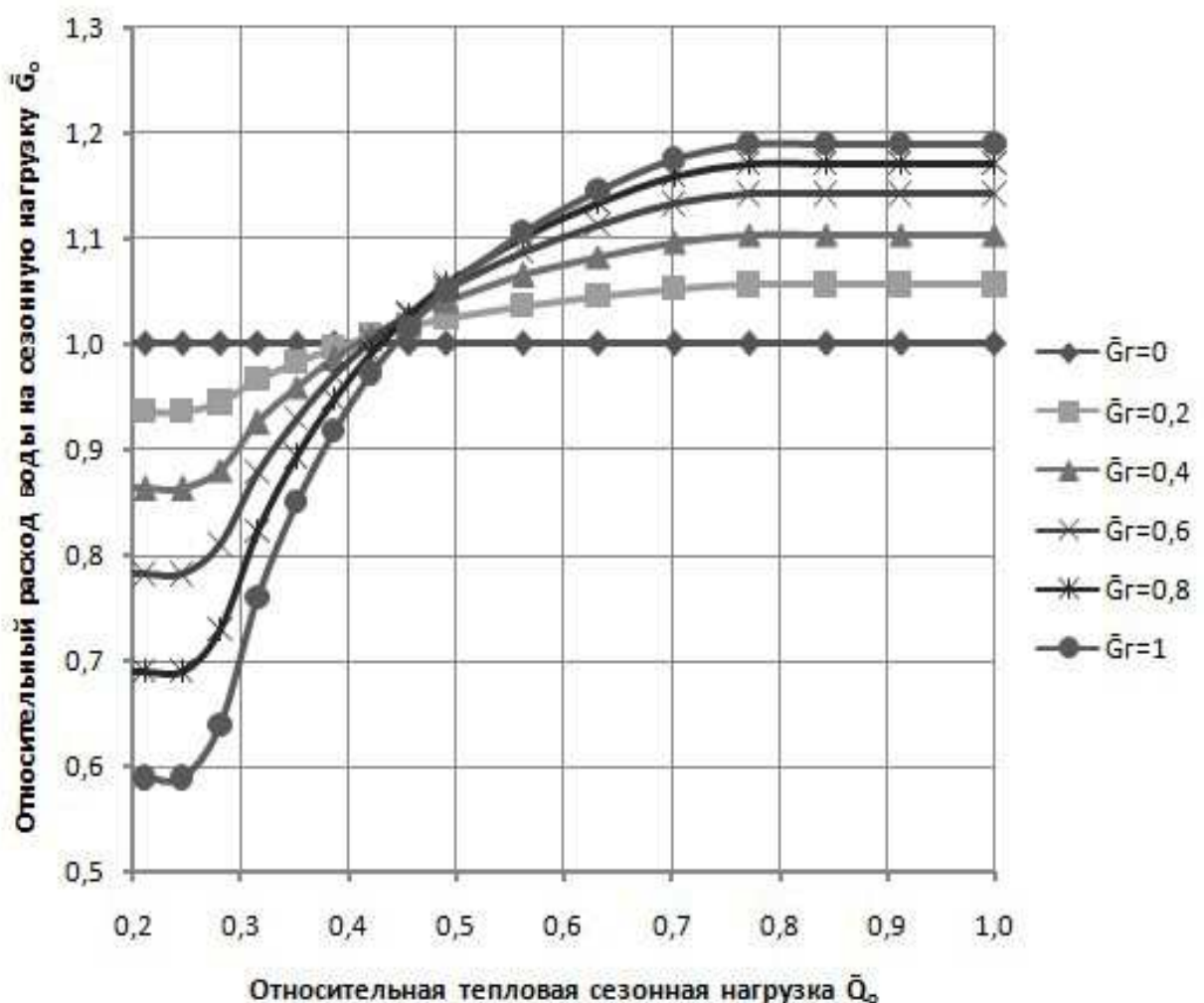


Рисунок 8 – Зависимость относительного расхода воды на сезонную нагрузку \bar{G}_o от относительной тепловой нагрузки \bar{Q}_o

Полученный график можно условно разделить на три диапазона. Первый диапазон соответствует наиболее низким наружным температурам

$\bar{Q}_o = 0,744 \div 1,0$ расход воды в системе отопления остается постоянным, потому что вся вода на нужды горячего водоснабжения отбирается из обратного трубопровода $\beta = 0$. Второй диапазон $\bar{Q}_o = 0,268 \div 0,744$ расход воды в системе отопления постепенно снижается, это связано с увеличением отбора воды на ГВС из подающего трубопровода. И третий диапазон $\bar{Q}_o = 0 \div 0,268$ входит в зону высоких наружных температур. Температура в подающем трубопроводе снижается до температуры на ГВС $\tau_1 = t_h$ и, следовательно, $\beta = 1$, а расход на отопление, как и в первом диапазоне, становится постоянным.

Рассмотрим, как изменится относительный расход воды на сезонную нагрузку при переходе с «отопительного» графика отпуска тепла на «скорректированный». Для расчета «скорректированного» графика принято: $\chi_6 = 1,2$; $Q_{hm} = 0,3$ МВт; $Q_{omax} = 1$ МВт. Остальные исходные данные остаются те же, что и в предыдущем расчете. Расчеты с Excel файла представлены в приложении В.

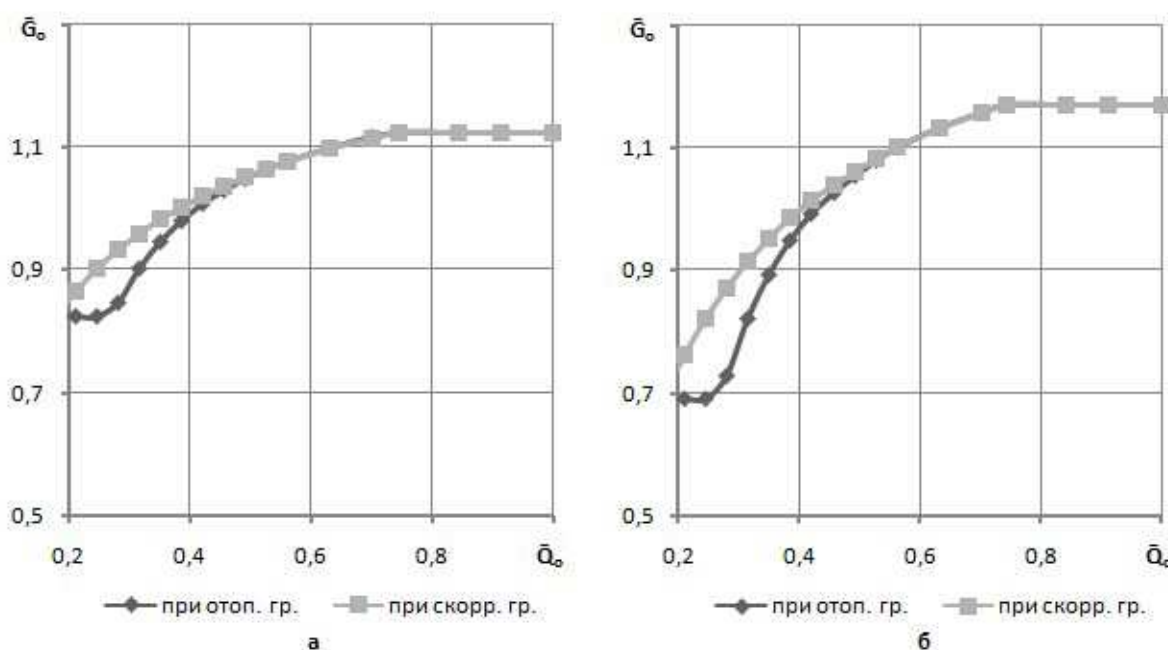


Рисунок 9 – Зависимость относительного расхода воды на сезонную нагрузку \bar{G}_o от относительной тепловой нагрузки \bar{Q}_o при «отопительном» и «скорректированном» графике отпуска тепла:

а – при $\bar{G}_h = 0,5$; б – при $\bar{G}_h = 0,8$.

На рисунке 9 можно наблюдать, что в диапазоне с низкими наружными температурами $\bar{Q}_o = 0,744 \div 1,0$ графики накладываются друг на друга, так как при расчете «скорректированного» графика температура сетевой воды в подающем и обратном трубопроводе для данной области принимается по «отопительному» графику. В диапазоне, где появляется водоразбор из подающего трубопровода, наблюдается преимущество «скорректированного» графика, так как в систему отопления поступает относительно больший расход воды.

3 Анализ гидравлических режимов закрытой системы теплоснабжения

3.1 Влияния горячего водоснабжения на режим работы сезонной нагрузки

Рассмотрим гидравлические режимы абонентских установок с параллельным включением подогревателя горячего водоснабжения при отсутствии регуляторов расхода.

Выражение для определения относительного расхода на сезонную нагрузку при параллельной схеме включения подогревателя горячего водоснабжения [6]:

$$\bar{G}_o = -\bar{G}_h(1 - \bar{S}_o) + \sqrt{\bar{G}_h^2[(1 - \bar{S}_o)^2 - (1 - \bar{S}_o)] + \Delta\bar{H}}, \quad (25)$$

где \bar{G}_h , \bar{S}_o , $\Delta\bar{H}$ – то же, что и в формуле (13).

Параметр подогревателя горячего водоснабжения [6]:

$$\Phi_{\Pi} = \frac{2,3lg\left(\frac{\tau_{h2}'' - t_c}{\tau_1'' - t_h}\right)\sqrt{(t_h - t_c)(\tau_1'' - \tau_{h2}'')}}{(t_h - t_c) - (\tau_1'' - \tau_{h2}'')}, \quad (26)$$

где τ''_{h2} – температура сетевой воды на выходе из подогревателя при температуре излома графика, °С;

τ''_1 – температура сетевой воды в подающем трубопроводе в «точке излома» графика, °С;

t_c – то же, что и в формуле (22);

t_h – то же, что и в формуле (12).

Безразмерная удельная тепловая нагрузка теплообменника [6]:

$$\varepsilon_B = \frac{t_h - t_c}{\tau_1 - t_c}, \quad (27)$$

где t_h , τ_1 – то же, что и в формуле (12);

t_c – то же, что и в формуле (22).

Относительный расход сетевой воды на горячее водоснабжение [6]:

$$\text{при } \varepsilon_B > \frac{1}{1 + \frac{1}{\Phi_{\Pi}}} \quad \bar{G}_h = \frac{0,49\rho}{\left[\sqrt{\frac{1}{\Phi_{\Pi}^2} + 1,4\left(\frac{1}{\varepsilon_B} - 0,65\right) - \frac{1}{\Phi_{\Pi}}} \right]^2} \cdot \frac{\tau'_1 - \tau'_{02}}{t_h - t_c}, \quad (28)$$

$$\text{при } \varepsilon_B < \frac{1}{1 + \frac{1}{\Phi_{\Pi}}} \quad \bar{G}_h = \frac{1,69\rho}{\left[\sqrt{\frac{1}{\Phi_{\Pi}^2} + 2,6\left(\frac{1}{\varepsilon_B} - 0,35\right) - \frac{1}{\Phi_{\Pi}}} \right]^2} \cdot \frac{\tau'_1 - \tau'_{02}}{t_h - t_c}, \quad (29)$$

где ρ – относительная нагрузка горячего водоснабжения;

τ'_1 , τ'_{02} – то же, что и в формуле (15);

Φ_{Π} – параметр подогревателя горячего водоснабжения;

ε_B – безразмерная удельная тепловая нагрузка теплообменника;

t_h – то же, что и в формуле (12);

t_c – то же, что и в формуле (22).

3.2 Компьютерная визуализация результатов расчета влияния горячего водоснабжения на режим работы сезонной нагрузки

На рисунке 10 показана зависимость относительного расхода воды на сезонную нагрузку \bar{G}_0 , найденную по формуле (25) при изменении

относительного расхода на горячее водоснабжения $\bar{G}_h = 0 \div 1$ и различных значениях относительного сопротивления отопительной системы \bar{S}_o . Расчеты с Excel файла представлены в приложении Г.

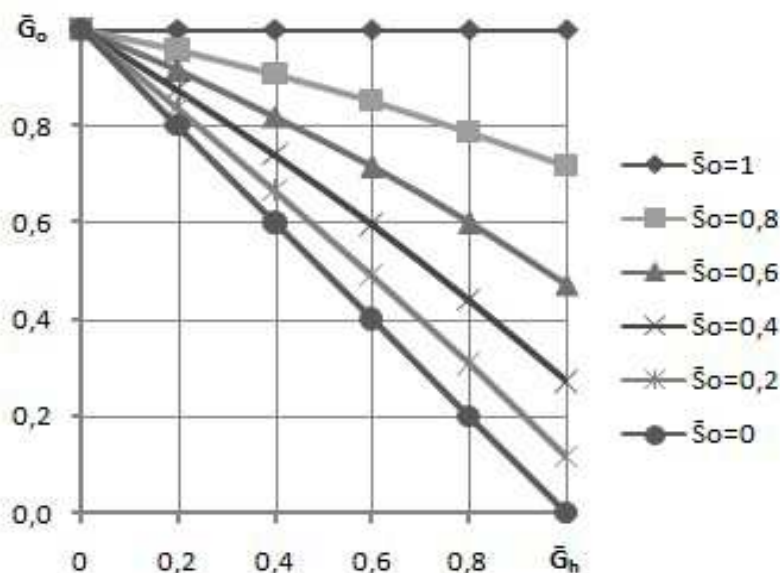


Рисунок 10 – Зависимость относительного расхода воды на сезонную нагрузку \bar{G}_o от величины расхода воды на горячее водоснабжения \bar{G}_h при параллельной схеме включения подогревателя

Как видно из графика, увеличение расхода воды на горячее водоснабжения \bar{G}_h приводит к уменьшению расхода в системе отопления \bar{G}_o , но при повышении гидравлической устойчивости системы теплоснабжения влияние горячего водоснабжения снижается.

На рисунке 11 показана зависимость относительного расхода воды на сезонную нагрузку \bar{G}_o от относительной тепловой нагрузки \bar{Q}_o при параллельной схеме включения подогревателя горячего водоснабжения. При расчете приняты следующие исходные данные: график отпуска тепла «отопительный» с параметрами 150 / 70; $\bar{S}_o = 0,8$; $t_o = -37$ °C; $t_{int} = 20$ °C; $\tau'_{o1} = 95$ °C; $t_h = 60$ °C; $t_c = 5$ °C; $\tau''_1 = 70$ °C; $\tau''_{h2} = 30$ °C. Расчеты с Excel файла представлены в приложении Д.

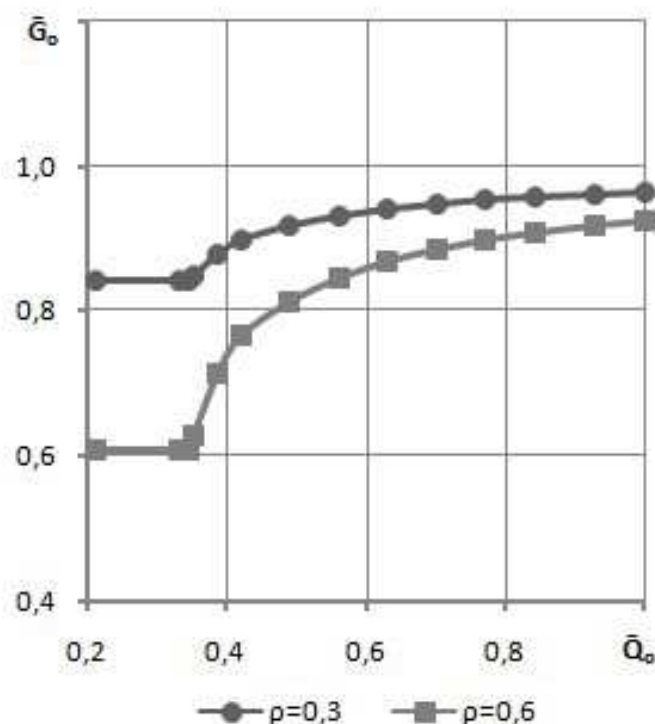


Рисунок 11 – Зависимость относительного расхода воды на сезонную нагрузку \bar{G}_o от относительной тепловой нагрузки \bar{Q}_o при параллельной схеме включения подогревателя

На основании представленного графика можно констатировать, что при постоянной нагрузке на горячее водоснабжение в течение отопительного сезона расход в системе отопления плавно уменьшается при снижении температуры в подающем трубопроводе, так как для нагрева в подогревателе ГВС того же количества водопроводной воды необходимо затратить большее количество сетевой. Компенсация недостатка тепла в системе отопления осуществляется повышением температурного графика или добавкой к расчетному расходу воды на отопление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из-за существенных различий в гидравлических режимах открытой и закрытой систем необходима разработка мероприятий по плавному переходу потребителей на приготовление горячей воды в теплообменниках, начиная с крупных микрорайонов, наиболее удаленных от источника теплоты. Таким образом, возможно, осуществить постепенный перевод всех потребителей на закрытые системы теплоснабжения, избежав проблемы борьбы автоматизированных и неавтоматизированных тепловых пунктов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С. А. Чистович, В. К. Аверьянов, Ю. Я. Темпель, С. И. Быков. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 248 с.
2. Батухтин А. Г., Калугин А. В. Моделирование современных систем централизованного теплоснабжения // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – № 8(55). – С. 84–91.
3. Белова О. В., Волков В. Ю., Скибин А. П. Метод контрольного объема для расчета гидравлических сетей // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 5(17). – С. 46.
4. Волков В. Ю., Крутиков А. А., Николаева А. В., Скибин А. П. Разработка метода расчета тепловых сетей большой размерности // Теплоэнергетика. – 2014. – № 11. – С. 69.
5. Захватова М. А., Гришкова А. В. Необходимость перевода открытых систем теплоснабжения на закрытые // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2016. – С. 414–418.
6. Зингер, Н. М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем / Н. М. Зингер. – 2-е изд., перераб. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 320 с.
7. Зингер, Н. М. Расчет и моделирование гидравлических режимов / Н. М. Зингер. – Л.: Издательство «Энергия», 1964. – 184 с.
8. Кассина Н. В., Смирнов Л. В. Математическое моделирование разветвленных гидравлических систем // Компьютерные исследования и моделирование. – 2009. – № 2. – С. 172–129.
9. Колесников А. Н. О переходе от открытых систем теплоснабжения и ГВС к закрытым (в трактовке 190-ФЗ) // «Новости теплоснабжения». – 2014. – № 11(171). – С. 48–52.
10. Колесников С. В., Кудинов И. В., Еремин А. В., Бранфилева А. Н. Использование компьютерных моделей для проектирования сложных

трубопроводных систем // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2014. – № 5. – С. 72–83.

11. Липовка Ю. Л. Влияние непосредственного водоразбора на режимы работы последовательно включенных теплообменников // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1979. – № 6. – С. 95–100.

12. Липовка Ю. Л. Режим работы теплофикационных вводов со смешанной нагрузкой отопления, вентиляции и горячего водоснабжения // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1986. – № 6. – С. 84–87.

13. Меренков, А. П. Теория гидравлических цепей / А. П. Меренков, В. Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 278 с.

14. Михайловский Е. А., Новицкий Н. Н. Модифицированный метод узловых давлений для расчета потокораспределения в гидравлических цепях при нетрадиционных замыкающих соотношениях // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2015. – № 2(218). – С. 30–42.

15. Новицкий Н. Н. Расчет потокораспределения в гидравлических цепях на базе их линеаризации узловыми моделями секущих и хорд // Известия российской академии наук. Энергетика. – 2013. – № 2. – С. 56–69.

16. Новицкий Н. Н., Вантеева О. В. Моделирование стохастики потокораспределения в гидравлических цепях // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2011. – № 2. – С. 122–131.

17. Новицкий Н. Н., Токарев В. В., Шалагинова З. И., Алексеев А. В., Гребнева О. А., Баринова С. Ю. Информационно-вычислительный комплекс "АНГАРА-ТС" для автоматизации расчета и анализа эксплуатационных режимов при управлении крупными многоконтурными системами теплоснабжения // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – № 11(142). – С. 126–144.

18. Новицкий Н. Н., Луценко А. В. Исследование задач и методов многокритериальной оптимизации гидравлических режимов распределительных тепловых сетей // Научный вестник Новосибирского

государственного технического университета. – 2016. – № 3(64). – С. 131–145.

19. Пухкал В. А., Федоров М. А., Шкаровский А. Л. Анализ систем автоматического регулирования одноступенчатой схемы присоединения водоподогревателей горячего водоснабжения в закрытых системах теплоснабжения // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 6(59). – С. 163–167.

20. Рафальская Т. А. Теоретические основы новой теории расчета переменных тепловых и гидравлических режимов работы тепловых пунктов централизованных систем теплоснабжения // Наука и мир. – 2014. – № 10(14). – С. 56–59.

21. Ротов П. В., Сивухин А. А., Ротова М. А. О регулировании нагрузки горячего водоснабжения в открытых системах теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка. – 2015. – № 3(95). – С. 32–37.

22. Сафонов, А. П. Сборник задач по теплофикации и тепловым сетям: учебное пособие для вузов / А. П. Сафонов. – 2-е изд., перераб. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.

23. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / Е. Я. Соколов. – 9-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 472 с.

24. Стенников В. А., Барахатенко Е.А., Соколов Д. В. Применение многоуровневого моделирования при определении оптимальных параметров теплоснабжающих систем // Теплоэнергетика. – 2017. – № 7. – С. 64–72.

25. Стренадко И. М., Рожков Р. Ю., Кийски А. В. О проблемах открытых систем теплоснабжения // «Новости теплоснабжения». – 2013. – № 1(149). – С. 25–28.

26. Теплоснабжение: учебник для вузов / А. А. Ионин, Б. М. Хлыбов, В. Н. Братенков, Е. Н. Терлецкая; под ред. А. А. Ионина. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с.

27. Шарапов, В. И. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения / В. И. Шарапов, П. В. Ротов. – М.: Издательство «Новости теплоснабжения», 2007. – 164 с.
28. Штыков Р. А. Математическая модель теплового и гидравлического расчета инженерных сетей // Автоматизация процессов управления. – 2011. – № 2. – С. 22–27.
29. Якшин С. В. Метод расщепления графа и принцип аддитивности тепловой сети // Вестник Иркутского государственного технического университета – 2017. – № 4(123). – С. 127–138.
30. Lipovka A. Y., Lipovka Y. L. Application of "gradient" algorithm to modeling thermal pipeline networks with pumping stations // Журнал сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии. – 2013. – № 1. – С. 28–35.
31. Lipovka A. Y., Lipovka Y. L. Determining hydraulic friction factor for pipeline systems // Журнал сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии. – 2014. – № 1. – С. 62–82.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчет при $\bar{S}' = \bar{S}'' = 0,5$

Исходные данные:	
\bar{S}'	0,5
\bar{S}''	0,5
$\Delta \bar{H}$	1

$\beta \backslash \bar{G}_h$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4
0,2	1,0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2
0,4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,6	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8
0,8	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7	0,6
1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,5	0,4

Расчет при $\bar{S}' = \bar{S}'' = 0,2$

Исходные данные:	
\bar{S}'	0,2
\bar{S}''	0,2
$\Delta \bar{H}$	1

$\beta \backslash \bar{G}_h$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
0,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1
0,4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9
0,8	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8
1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Исходные данные:	
\bar{S}'	0,3
\bar{S}''	0,3
$\Delta \bar{H}$	1
t_o	-37
t_{int}	20
τ'_{1}	150
τ'_{2}	70
τ'_{o1}	95
t_h	60

$\Delta t'_o$	62,5
$\delta \tau'$	80
θ'	25

Расчет "отопительного" графика			
t_n	\bar{Q}_o	τ_1	τ_2
10	0,2	47,4	33,3
8	0,2	52,2	35,3
6	0,2	56,9	37,3
4	0,3	61,6	39,1
2	0,3	66,2	40,9
0	0,4	70,7	42,7
-2	0,4	75,2	44,4
-4	0,4	79,7	46,0
-6	0,5	84,1	47,7
-8	0,5	88,6	49,3
-12	0,6	97,3	52,4
-16	0,6	105,9	55,4
-20	0,7	114,4	58,3
-24	0,8	122,9	61,2
-28	0,8	131,3	63,9
-32	0,9	139,7	66,7
-37	1,0	150,0	70,0

$\beta \backslash \bar{G}_h$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6
1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6
1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6
0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6
0,8	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8
0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9
0,4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
0,2	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
0,1	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
0,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2
0,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2
0,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2
0,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2
0,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Исходные данные:	
\bar{S}'	0,3
\bar{S}''	0,3
$\Delta \bar{H}$	1
t_o	-37
t_{int}	20
τ'_1	150
τ'_2	70
τ'_{o1}	95
t_h	60
t_c	5
χ_6	1,2
\bar{Q}_{hm}	300000
\bar{Q}_{omax}	1000000

$\Delta t'_o$	62,5
$\delta \tau'$	80
θ'	25
α^6_h	0,36

Расчет "скорректированного" графика						
t_n	\bar{Q}_o	τ_1	τ_2	\bar{W}_o	τ^k_1	τ^k_2
10	0,2	47,4	33,3	0,48	60,2	31,0
8	0,2	52,2	35,3	0,54	64,0	33,1
6	0,2	56,9	37,3	0,60	67,8	35,2
4	0,3	61,6	39,1	0,65	71,6	37,2
2	0,3	66,2	40,9	0,70	75,4	39,2
0	0,4	70,7	42,7	0,74	79,1	41,1
-2	0,4	75,2	44,4	0,78	82,8	43,0
-4	0,4	79,7	46,0	0,81	86,4	44,8
-6	0,5	84,1	47,7	0,84	90,1	46,6
-8	0,5	88,6	49,3	0,87	93,7	48,3
-10	0,5	92,9	50,8	0,89	97,3	50,0
-12	0,6	97,3	52,4	0,91	101,0	51,7
-16	0,6	105,9	55,4	0,95	108,1	55,0
-20	0,7	114,4	58,3	0,98	115,3	58,2
-22,4	0,7	119,5	60,0	1,00	119,5	60,0
-28	0,8	131,3	63,9	1,03	131,3	63,9
-32	0,9	139,7	66,7	1,05	139,7	66,7
-37	1,0	150,0	70,0	1,08	150,0	70,0

$\beta \backslash \bar{G}_h$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6
0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7
0,8	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8
0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8
0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9
0,4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
0,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
0,2	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
0,1	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
0,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2
0,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2
0,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2
0,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Исходные данные:	
$\Delta \bar{H}$	1

$\bar{S}_o \backslash \bar{G}_h$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,8	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7
0,6	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
0,4	1,0	0,9	0,7	0,6	0,4	0,3
0,2	1,0	0,8	0,7	0,5	0,3	0,1
0	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,0

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Исходные данные:	
ξ_o	0,8
$\Delta \bar{H}$	1
t_o	-37
t_{int}	20
τ'_1	150
τ'_2	70
τ'_{o1}	95
t_h	60
t_c	5
τ''_1	70
τ''_{h2}	30

$\Delta t'_o$	62,5
$\delta \tau'$	80
θ'	25
Φ_n	2,86

t_H	\bar{Q}_o	τ_1	τ_2	ε_B	$\bar{G}_h (\rho=0,3)$	$\bar{G}_h (\rho=0,6)$	$\bar{G}_o (\rho=0,3)$	$\bar{G}_o (\rho=0,6)$
10	0,2	70,0	56,0	0,85	0,63	1,26	0,84	0,61
8	0,2	70,0	53,2	0,85	0,63	1,26	0,84	0,61
1	0,3	70,0	43,3	0,85	0,63	1,26	0,84	0,61
0,32	0,3	70,0	42,4	0,85	0,63	1,26	0,84	0,61
0	0,4	70,7	42,7	0,84	0,61	1,22	0,85	0,63
-2	0,4	75,2	44,4	0,78	0,51	1,01	0,88	0,71
-4	0,4	79,7	46,0	0,74	0,43	0,86	0,90	0,77
-8	0,5	88,6	49,3	0,66	0,36	0,72	0,92	0,81
-12	0,6	97,3	52,4	0,60	0,31	0,62	0,93	0,84
-16	0,6	105,9	55,4	0,55	0,27	0,54	0,94	0,87
-20	0,7	114,4	58,3	0,50	0,24	0,48	0,95	0,88
-24	0,8	122,9	61,2	0,47	0,22	0,44	0,95	0,90
-28	0,8	131,3	63,9	0,44	0,20	0,40	0,96	0,91
-33	0,9	141,7	67,3	0,40	0,18	0,36	0,96	0,92
-37	1,0	150,0	70,0	0,38	0,17	0,33	0,96	0,93


Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный
институт

Инженерные системы зданий и сооружений
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 А.И. Матюшенко

подпись инициалы, фамилия

« 5 » июль 2019 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

08.03.01 «Строительство»

Анализ и управление гидравлическими режимами водяной тепловой сети
тема

Руководитель



подпись, дата
04.07.2019г.

профессор, д.т.н
должность, ученая степень

Ю.Л. Липовка
инициалы, фамилия

Выпускник

 04.07.19
подпись, дата

А.С. Венин
инициалы, фамилия

Нормоконтролер


подпись, дата
04.07.2019г.

Ю.Л. Липовка
инициалы, фамилия

Красноярск 2019